

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

微冷卻器之整合研究(1/3)—子計劃一：微冷卻器之熱流技術研究

The Research on the Thermo-fluid Technology of Micro Coolers

計劃編號：NSC-89-2218-E-032-001

(第一年)執行期間：88 年 08 月 01 日至 89 年 07 月 31 日

主持人：杜文謙 執行機構：淡江大學機械工程學系

E-mail: david1@mail.tku.edu.tw

一、中文摘要

本計劃以實驗的方式來探討矽質微流道熱沉的二相流熱流特性，使用甲醇為工作流體，針對不同幾何形狀的微流道及流量進行測試分析。實驗的重點在於探討微流道熱沉幾何形狀、工作流體流速及相變化等對於工作流體性質、熱傳性能及壓力降的影響；實驗測試中更以直接視流觀察對微流道中汽泡生成的問題加以探討。實驗分析結果可清楚的發現流體的相變化有助於熱傳性能的提昇及不同於單相流的熱傳行為，更說明了微流道熱沉的優良散熱性能。如果輔以妥善的周邊設計，將可成為微冷卻器而應用於高功率電子產品上。

關鍵詞：微流道、相變化、視流

Abstract

This project proposed a experimental approach to investigate the characteristics of two phase flow in the microchannel heat sink. Using methanol as the working liquid, micro channel with different geometry and a variety of flow rate were evaluated. The influence of micro channel configuration, liquid velocity and phase change on the fluid property, heat transfer performance, and pressure drop were analyzed experimentally. Bubbles formation were also analyzed through flow visualization. The boiling of liquids in micro channels has many potential applications in a wide variety of advanced technologies due to its unusual phenomena.

Keywords: Micro channel, Phase change, Flow visualization

二、緣由與目的

諸多文獻中提及層流狀態流體在微流道熱沉中的熱傳效果比傳統大尺寸管路中的紊流狀態優良，而相變化過程所能帶走的熱量更高，足可應付未來高功率電子產品所產生的廢熱。由於近年來微機電系統（Micro-Electro-Mechanical Systems）相關技術及半導體製程的日趨成熟，使我們可以製造出水力直徑（Hydraulic Diameter）數十至數百微米之微流道，透過液體強制對流的使用，將可有效的解決電子產品因過熱所產生的當機甚至毀損問題。

最早結合微機電系統與微流道熱沉概念的是 Tuckerman & Pease[1]在 1981 年所提出，以理論的分析與實驗測試對於微流道熱沉的熱傳性能加以探討。理論的分析對微流道熱沉做了最佳化設計，而實驗結果熱通量可達到 $790\text{W}/\text{cm}^2$ ，可應用於高功率密度的超大型積體電路（VLSI）上。

Yang & Zhang[2]、Peterson & Ortega[3]等指出，二十世紀的最後十年將會見證到微米與奈米尺寸傳輸現象的快速發展，將會在微電子及航空熱控制上有重要的應用。並表示熱控制最好的方法便是將熱沉與電子裝置儘可能的靠近結合在一起，亦即是透過微流道熱沉的使用。Pfahler et al.[4]、Choi et al.[5]等人亦提到微流道或微管中的流體行為與熱傳特性違背了傳統大尺寸管道中的實驗結果，並且擁有絕佳的散熱效果。

Peng & Wang[6-9]及其工作團隊從事了一連串以相變化為主的流體流經微流道結構中熱傳特性的研究。發現當流道壁有較高的熱通量或過熱溫度時，根據現有的沸騰曲線而言可以產生核沸騰，卻沒有

發現汽泡在微流道中產生。顯示出流體流經流道的幾何尺寸大小會嚴重的影響著相變化，對於研究二相流而言，這是個非常重要的發現，也說明了還有許多需要我們去深入探討的地方。Peng & Wang[10]於1998年更以實驗和理論分析來探討微流道中的沸騰特性和熱傳現象，分析中指出核沸騰在微流道中是近乎不可能發生的，並以兩個假設的概念“蒸發空間 (Evaporating Space)”及“虛擬沸騰 (Fictitious Boiling)”來描述與解釋此物理過程與基本現象。

可以確定的是微流道中的流體相變化將出現一些新的特性，這對於一些有沸騰或相變化的實際案例而言是非常重要的，如航空熱控制時高性能微熱管的設計、電子元件的冷卻、微型熱交換器的發展等。因此本文企圖以實驗的方法來探討流體流經微流道熱沉的相變化熱流特性，以期能深入了解微流道相變化之基本機制。

三、微流道熱沉製程與封裝

本文以矽晶片作為微流道熱沉的基材，其優點在於可以與電子元件相同材料且相同製程而結合在一起。製程技術主要為半導體製程中的體型微細加工 (Bulk Micromachining)，包括了薄膜沉積 (Thin Film Deposition)、光微影製程 (Photolithography)、濕蝕刻 (Wet Etching) 而得所需的微流道幾何形狀。而微結構的封裝則採用矽晶片與#7740 玻璃的靜電接合 (Anodic Bonding)，利用其電性的關係使兩者之間產生化學鍵結而結合在一起。

本文選用 (100) 矽晶片為基材，經濕蝕刻後，由於其結晶特性，可以在 (111) 斜面及 (100) 底面得到非常良好的平整度。如此將較能符合理論的假設及方便實驗的分析探討。微流道熱沉的示意圖及相關規格如圖 1 及表 1 所示。

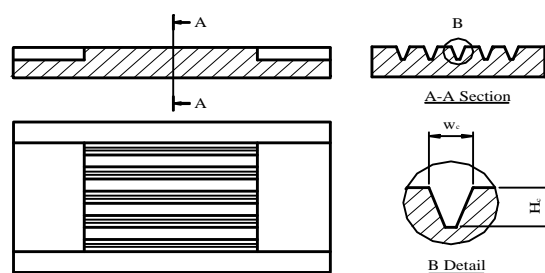


圖 1 微流道熱沉示意圖

Test Section	W_c [μm]	H_c [μm]	D_h [μm]	V [m/s]
No.1 / 5	1000	125	214	0.8 / 0.53
No.2 / 6	400	125	168	0.9 / 0.6
No.3 / 7	1000	260	374	0.43 / 0.29
No.4 / 8	400	260	210	0.62 / 0.42

表 1 微流道熱沉測試規格表

四、測試設備與實驗概述

本文採用等熱傳的加熱方式進行熱傳測試，以加熱片模擬電子元件的熱點，利用微流道熱沉進行熱傳性能測試。實驗測試循環如圖 2 所示，包括工作流體循環系統、冷卻流體循環系統、測試模型等。

實驗測試中，工作流體利用外部冷卻循環系統及進入微流道前的熱交換器而保持在一個均勻溫度的狀態。工作流體由儲存槽以幫浦加壓經過測試區段和流量計，旁通管路則允許部份工作流體流回儲存槽，同時確保工作流體在儲存槽中得以良好的混合及保持均勻的溫度。

微流道熱沉進出口裝設有量測溫度及壓力的熱電偶 (Thermocouple) 及壓力感測器，熱沉背面並黏貼兩組熱電偶以量測微流道壁溫，量測數據則由資料擷取系統連接電腦輸出。加熱功率則由一電源供應器控制，並記錄其電壓及電流值。工作流體的流量由流量計控制，而流量計則先以重量法 (Weighing Method) 加以校正。每一次測試中，必須先使系統達到穩定的狀態，才能進行量測並記錄其相關數據。

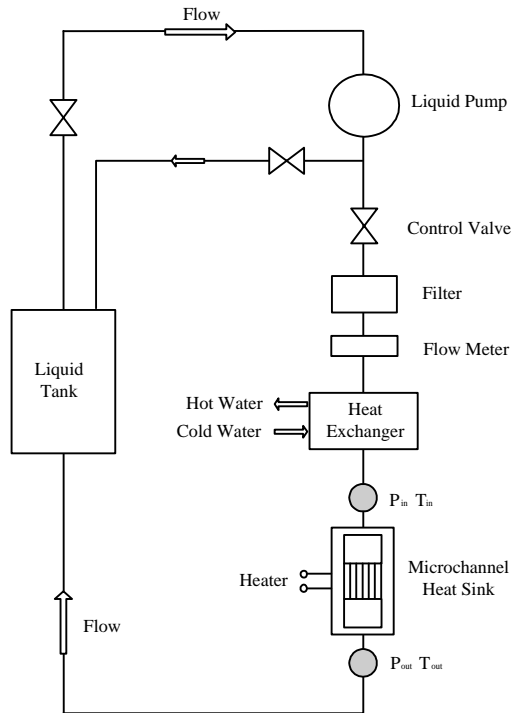


圖 2 測試循環示意圖

五、理論與數據分析

實驗測試所得的數據由以下相關的理論公式加以計算歸納。

熱通量 (Heat Flux) :

$$q'' = \frac{rIV}{LW} \quad (1)$$

公式中 I 與 V 分別代表電源供應器所施加的電流及電壓, L 與 W 則為微流道熱沉的長度及寬度。修正因子 r 可用來估算所有的損失熱量, 在此以微流道進出口的顯熱 (Sensible Heat) 來修正確實的加熱量。

熱對流係數 (Heat Transfer Coefficient) :

$$h = \frac{rIV}{A(T_w - T_f)} \quad (2)$$

公式中 A 代表微流道熱沉與工作流體所接觸的總面積, T_w 為微流道壁溫, 由黏貼在熱沉背面之兩組熱電偶所量測的溫度平均而得。 T_f 則為工作流體溫度, 由進出口之熱電偶所量測的溫度平均而得。

六、實驗結果與討論

本文以實驗測試的方式進行微流道熱

沉的熱傳性能探討, 特別針對相變化部份。實驗中以甲醇為工作流體, 在不同幾何形狀及不同流量下進行測試, 更以實際的視流觀察加以驗證說明。以下為歸納的結果。

圖 3 所示為熱通量與流體出口溫度的關係, 由公式 (1) 計算而得, 明顯的可以發現在八種不同組合的測試結果中, 流量為影響熱通量的最大因素。No.1-4 與 No.5-8 為兩組不同的流量, 雖然水力直徑與流速不同, 但在相同的流量下每組所表現出來的熱通量趨勢相同。很明顯的, 流量大時可以得到較高的熱通量。而當流體出口溫度達相變化所需溫度時, 八組測試結果其熱通量皆有急速上升的情形, 顯示出此時微流道熱沉可藉由潛熱 (Latent Heat) 帶走非常大量的熱。

圖 4 所示為熱對流係數與流體出口溫度的關係, 由公式 (2) 計算而得, 由圖中可看出在單相流區熱對流係數與出口溫度無關, 而相變化區伴隨著出口溫度些微的變動, 熱對流係數則有急速增加的傾向, 乃因相變化時流體增加擾動的緣故。圖中顯示當 $W_c = 1000 \mu m$ 時在相變化區域其熱對流係數增加的較陡遽, 由於尚有許多影響因素, 在此無法加以定論。

圖 5 所示為進出口壓力降與流體出口溫度的關係, 很明顯的說明了單相流區域與相變化區域有很大的分別。在單相流區域方面, 由於工作流體溫度的增加, 使得其黏度 (Viscosity) 下降導致壓力降有些微下降的趨勢。而當溫度到達相變化區時, 由視流觀察中可看出流道入口處有沸騰現象產生, 阻礙了流體流動而導致壓力降急速上升。另一個原因是由於溫度升高導致流體體積膨脹而使流速變快, 如此將導致流體所承受的剪力增加而使壓力降升高。由圖中另可看出, 當 H_c 為 $125 \mu m$ 時其壓力降陡增特別明顯, 是否與汽泡生成所需的高度有關仍需進一步了解。

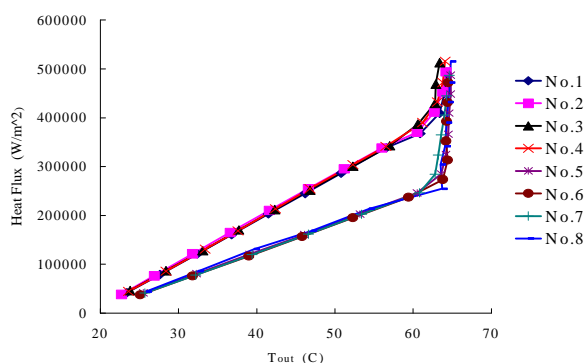


圖 3 熱通量與出口溫度關係圖

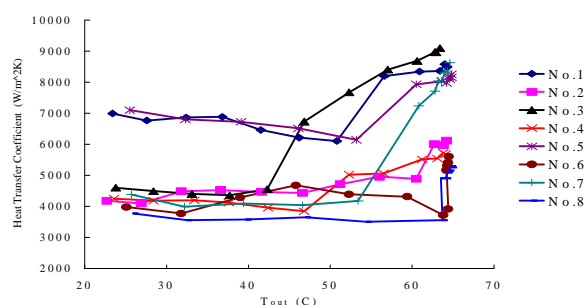


圖 4 熱對流係數與出口溫度關係圖

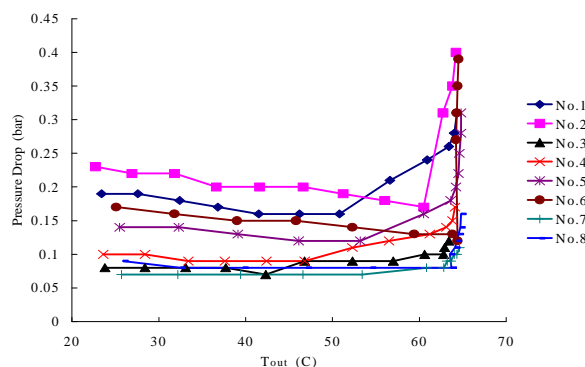


圖 5 壓力降與出口溫度關係圖

本文在實驗中利用高倍率顯微鏡於測試中進行視流觀察，以便了解並發現一些新的物理現象。以水力直徑 $D_h=374\mu\text{m}$ 的試片配合小流量時，可以發現微流道內有非常快速的流線產生，而且其進出口有滾沸的現象發生。而在微流道內亦可以發現有沸騰成核的現象，但因為流體的流速過快而將之帶走甚至沖毀，因此無法觀測到汽泡。進一步將測試條件調整至流線消失時，可發現流道出口處有汽泡生成，很明顯的可以判斷出汽泡比流道的水力直徑小得多。而最後將工作流體流量調至近乎靜止時，加熱後可從顯微鏡下發現流道內有

汽泡的生成。

由以上視流觀察的結果可發現，微流道中是否能夠生成汽泡除了流道水力直徑大小及加熱通量的原因外，更與流道內流體的流速及壓力有很大的關係，有足夠的空間卻可能因為流體流速與壓力的關係而無法生成汽泡。此點與文獻[10]中 Peng & Wang 所提出的論點“蒸發空間”有所差別，而相關論點及臨界成核水力直徑等問題需進一步的實驗觀察來加以定論。

七、結論

本文主要對微流道熱沉於二相流時的熱傳行為進行探討，實驗結果證明了微流道熱沉的相變化區域熱傳效果遠高於單相流區域，可帶走大量的熱能。實驗結果亦對熱通量、熱對流係數及進出口壓力降做歸納分析，顯示出三者相變化區皆有陡升的現象產生。實驗的視流觀察更發現了微流道內影響汽泡生成的因素除了加熱量與水力直徑外，流道內流體的流速及壓力亦有絕對的關聯。可以確定的是，在正常條件下，微流道內要生成汽泡是近乎不可能的。

本文由於屬於初步實驗，尚無法對實驗結果做更多的結論，因此未來將針對微流道內相變化的相關問題作更深入的研究。同時未來將在製程、封裝及測試方式上加以改良，以期能得到更準確且更具體的結論。

八、參考文獻

- [1] D. B. Tuckerman, R. F. W. Pease, “High-Performance Heat Sinking for VLSI”, *IEEE Electronic Device Letters*, Vol. EDL-2(5), No. 4, pp. 126-129, 1981
- [2] W. J. Yang, N. L. Zhang, “Micro- and Mano-Scale Heat Transfer Phenomena Research Trends”, *Transport Science and Technology*, pp. 1-15, 1992
- [3] G. P. Peterson, A. Ortega, “Thermal Control of Electronic Equipment and Devices”, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 17, pp. 181-314, 1990

- [4] J. Pfahler, J. Harley, H. H. Bau, and J. Zemel, "Liquid Transport in Micron and Submicron Channels", *J. Sensors Actors*, A21-23, pp. 431-434, 1990
- [5] S. B. Choi, R. F. Barron, R. O. Warrington, "Liquid Flow and Heat Transfer in Microtubes" *ASME Micromechanical Sensors, Actuators and Systems*, DSC-Vol. 32, pp. 123-128, 1991
- [6] X. F. Peng, B. X. Wang, "Forced Convection and Flow Boiling Heat Transfer for Liquid Flowing through Microchannels" *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 14, pp. 3421-3427, 1993
- [7] B. X. Wang, X. F. Peng, "Experimental Investigation on Liquid Forced Convection Heat Transfer through Microchannels" *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37 Suppl. 1, pp. 73-82, 1994
- [8] X. F. Peng, G. P. Peterson, B. X. Wang, "Heat Transfer Characteristics of Water Flowing through Microchannels", *Experimental Heat Transfer*, Vol. 7, PP. 265-283, 1994
- [9] X. F. Peng, B. X. Wang, G. P. Peterson and H. B. Ma, "Experimental Investigation of Heat Transfer in Flat Plates with Rectangular Microchannels", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 1, pp. 127-137, 1995
- [10] X. F. Peng, B. X. Wang, "Boiling Characteristics in Microchannels /Microstructures", *The 11th Int. Symposium on Transport Phenomena*, ISTP-11, No. 78, pp. 485-491, 1998